

Новые методы сейсмоакустического мониторинга в условиях Арктического шельфа // Разведка и разработка // Наука и ТЕХНОЛОГИИ

Преснов Д. А., Собисевич А. Л., Шуруп А. С

17 февраля 2017 г., 16:13Neftegaz.RU649

Разработка новых методов сейсмоакустического мониторинга различных характеристик арктических акваторий должна основываться на совместном рассмотрении волновых процессов в системе «литосфера - гидросфера - ледовый покров - атмосфера».

Геоакустические и гидроакустические поля, порождаемые наведенными геодинамическими процессами в такой сложно построенной геофизической среде, несут полезную информацию, позволяющую развивать новые технологии мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов, как на [шельфе](#), так и в других, покрытых сплошным ледовым покровом районах Северного Ледовитого океана.

Инструментальной базой новой технологии круглогодичного мониторинга могут стать распределенные антенные системы ледового класса, использующие в качестве воспринимающих элементов широкополосные векторные молекулярно-электронные приемники.

Сегодня минерально-сырьевые ресурсы континентального шельфа Северного Ледовитого океана представляют собой весомую часть стратегического потенциала Российской Федерации.

В настоящее время уже осуществляется промышленное освоение разведанных месторождений, вводятся в эксплуатацию современные буровые платформы, в северные территории государство вкладывает значительные финансовые средства. Сформулированы основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2020 г. и на дальнейшую перспективу.

Они определяют масштабы геолого-геофизических работ на шельфе, гидрографических и картографических исследований, обеспечивающих подготовку неопровержимых доказательств по обоснованию внешней границы Арктического шельфа РФ и защиты наших национальных интересов в ООН.

Эти работы успешно проводятся с использованием научно-исследовательских сейсмических судов.

Однако промежуток времени, когда можно выполнять все виды поисковых исследований с надводных судов на шельфе северных морей, ограничен и составляет в среднем от двух до трех летних месяцев.

Несмотря на постоянное развитие методов морской сейсморазведки большинство промышленных технологий по-прежнему базируются на законе отражения продольных

сейсмических волн от геологических слоев, т.е. на физических принципах, заложенных более 70 лет назад. При этом основное развитие методов сейсморазведки связано в основном с использованием все более совершенных технических средств, например, используются современные суда, буксирующее за собой источник сигнала и один (2D-разведка) или несколько (3D-разведка) кабелей, снабженных приемниками гидроакустического давления - сейсмических кос.

В условиях Арктического шельфа при наличии ледового покрова навигация подобных судов и использование геологоразведочного оборудования становится чрезвычайно сложной в реализации и дорогостоящей задачей. Кроме этого, применение импульсных излучателей достаточно мощных для проникновения волны на заданную глубину, требует дополнительных энергозатрат и небезопасно с экологической точки зрения, так как пагубно сказывается на морских обитателях.

Помимо задач сейсморазведки актуальной также является проблема обеспечения безопасности как отдельных добывающих платформ, так и всей северной границы РФ от неконтролируемого проникновения различных подводных объектов.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является гидроакустический мониторинг арктических акваторий, позволяющий в режиме, близком к режиму реального времени, получать информацию о пространственно-временной изменчивости характеристик акваторий с размерами в десятки и даже сотни километров.

Следует отметить, что знание характеристик водного слоя требуется и при реализации традиционных методов сейсморазведки, так как неоднородная движущаяся водная среда может оказывать заметное влияние на распространение зондирующих импульсов из воды в дно и обратно, определяя тем самым возможные ошибки при оконтуривании углеводородных месторождений.

Существует класс задач, связанных с локализацией различных заглубленных в морское дно структур (например, морское строительство, изучение питающих каналов подводных вулканов, обнаружение морских мин и т.п.), в которых также могут находить свое применение сейсмоакустические волновые процессы, а для их успешного решения требуется не только априорная информация о характеристиках дна, но и данные о водном слое и ледовом покрове.

Также следует отметить целый ряд специальных задач, связанных с оценкой параметров ледового покрова.

Особую актуальность эти задачи приобретают в последнее время в связи с критическими изменениями состояния льда, наблюдаемыми в Арктике.

С одной стороны, мониторинг состояния ледового покрова важен для планирования работ по сейсмопрофилированию. С другой стороны, свойства ледового покрова непосредственно влияют на характер распространения гео-гидроакустических волн в океаническом волноводе, а значит должны быть определены как при решении задач сейсморазведки, так и при организации гидроакустического мониторинга арктических акваторий. В связи с этим возникает задача разработки нового поколения методов и средств, обеспечивающих более точный и при этом более долгосрочный прогноз изменений основных параметров ледового покрова океана, а также, в общем случае, и атмосферы с учетом наблюдающихся изменений в арктическом регионе.

В связи с вышесказанным актуальна задача разработки новых подходов к сейсмоакустическому мониторингу различных характеристик арктических акваторий,

основанных на совместном рассмотрении волновых процессов в системе «литосфера - гидросфера - ледовый покров - атмосфера».

На наш взгляд, инновационные технологии геологоразведки и мониторинга среды должны быть не только активными, но и включать возможности пассивных наблюдений, использующих в качестве источника информации о среде естественные, а не специальным образом генерируемые сигналы.

В этом случае геоакустические и гидроакустические поля, порождаемые наведенными геодинамическими процессами в рассматриваемой сложно построенной геофизической среде, несут полезную информацию, которая позволяет развивать новые технологии пассивного мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов, как на шельфе, так и в других, покрытых сплошным ледовым покровом районах Северного Ледовитого океана. Применительно к арктическим условиям при наличии ледового покрова, задача разработки пассивных технологий подобного рода до сих пор подробно не рассматривалась. Однако известны результаты успешного практического применения пассивных методов при сейсмоакустическом зондировании на суше.

Пассивные сейсмические методы, развиваемые сегодня для задач наземной разведки, можно разделить на два класса:

- 1) основанные на измерении сигналов от локализованных источников;
- 2) основанные на измерении случайного шумового фона.

К методам первого класса относятся локальная томография по временам прихода продольных и поперечных волн [1] и эмиссионная томография, базирующаяся на присутствии доминантных частот [2].

В этом случае землетрясения или сейсмическая эмиссия используются как просвечивающие среду сигналы.

Недостатком этого класса методов является то, что область их применимости ограничена сейсмоактивными регионами.

Альтернативой являются методы второй группы, базирующиеся на том, что микросейсмический шум, всегда присутствующий в условиях проведения сейсморазведочных работ, сформирован в основном поверхностной волной рэлеевского типа. При этом для зондирования среды используется зависимость глубины проникновения волны от ее длины волны.

Таким образом, максимально возможная глубина исследования определяется не мощностью источника, а частотой присутствующей в шумовом фоне волны.

Выделим отдельно метод низкочастотного микросейсмического зондирования [3] смысл которого заключается в определении пространственных вариаций амплитудного спектра шума.

Этот метод достаточно прост с точки зрения технической реализации, так как время накопления сигнала составляет порядка 2-4 часов и не требует специализированного оборудования. Метод успешно применяется для изучения различных геологических неоднородностей до глубин ~ 40 км.

Недостатком метода является его эмпирическое происхождение и отсутствие достаточных результатов моделирования. Существует также метод пассивной поверхностно-волновой

томографии [4], суть которого в анализе частотной зависимости скоростей, то есть дисперсионных кривых, поверхностных волн в различных пространственных областях.

Последний метод представляется наиболее обоснованным с математической точки зрения и становится все более популярным во всем мире при изучении коры и верхней мантии Земли.

Физической основой пассивных технологий мониторинга подобного рода является возможность оценки функции Грина двух разнесенных в пространстве точек приема на основе функции взаимной корреляции естественных шумов, записанных в этих точках. Возможность такой оценки была продемонстрирована как теоретически, так и при проведении экспериментальных работ в сейсмологии и независимо в гидроакустике.

В итоге традиционные методы сейсморазведки, включающие излучение мощных сигналов, оказывается возможным дополнить, а в ряде случаев и заменить пассивными методами мониторинга, основанными на накоплении и последующей пространственно-временной корреляционной обработке естественного шумового поля, формирующегося в исследуемой среде. К его недостаткам можно отнести необходимость длительного времени накопления шумового сигнала (от 24 часов), которое определяется конкретным регионом проведения исследований.

Перечисленные пассивные методы разработаны для использования на суше и при применении на морском шельфе могут столкнуться с определенными трудностями, особенно это относится к методам второй группы, так как шумовое поле на дне значительно отличается от поля на суше и включает в себя различные помехи.

В связи с этим для успешного изучения характеристик геологической среды на шельфе пассивными методами необходимо развивать способы фильтрации помех и выделения полезного сигнала.

В случае достижения требуемого отношения сигнал/помеха открываются новые возможности изучения сложной системы «литосфера - гидросфера - ледовый покров - атмосфера» на основе анализа волновых структур, распространяющихся в слоистой среде при наличии ледового покрова.

В рамках теоретического исследования нами были проанализированы особенности возбуждения и распространения различных типов волн в модельной среде, приближенно соответствующей условиям мелкого моря, покрытого льдом [5]. Математическое моделирование волновых процессов на Арктическом шельфе удобно выполнять в рамках вертикально слоистой модели, включающей изотропное твердое полупространство, слой однородной сжимаемой жидкости, изотропный твердый слой.

В этом случае среди компонент полного волнового поля можно выделить те, которые представляют наибольший интерес с точки зрения восстановления параметров рассматриваемой среды (рис. 1):

- изгибная волна ледового покрова, существующая на всех частотах и распространяющаяся при практически любом соотношении фазовых скоростей продольных и поперечных волн в среде.

Фазовая скорость этой волны критична к выбору толщины ледового слоя и, следовательно, может использоваться для мониторинга ледового покрова;

- волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы упругого слоистого полупространства и также существующая на всех частотах - «фундаментальная» мода.

Именно эта волна может рассматриваться в качестве основного источника геоакустической информации о глубинном строении океанического дна.

В случае отсутствия ледового покрова фундаментальной моде соответствует так называемая волна Шолте (иногда также называемая волной Стоунли), донная поверхностная волна, не имеющая критической частоты и распространяющаяся вдоль границы «жидкий слой - упругое полупространство»;

- гео-гидроакустические моды, характеристики которых определяются параметрами всех сред.

Этот тип волн преобладает в данных, регистрируемых в придонных слоях, и используется традиционно для мониторинга состояния водного слоя, включая профиль скорости звука, температуру и соленость, для оценки упругих параметров приповерхностного слоя донного грунта, а также для обнаружения подводных объектов.

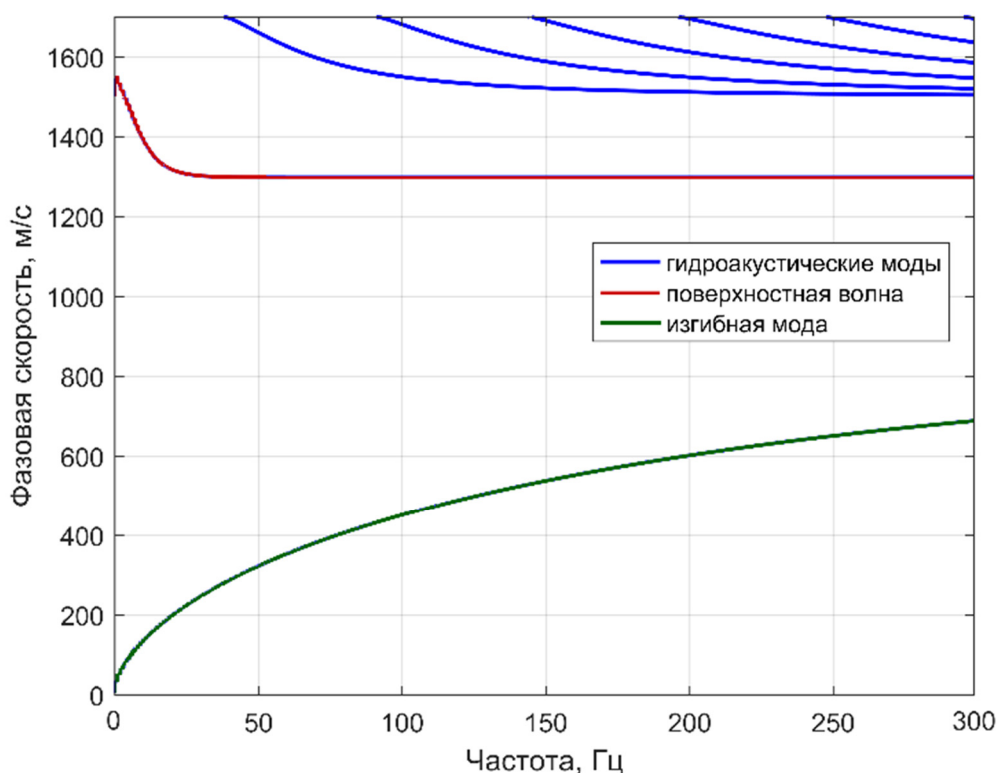


РИС. 1. Дисперсионные зависимости основных мод при глубине моря 30 м и толщине льда 1 м

В качестве полезного источника информации далее будем рассматривать дисперсию скорости фундаментальной моды поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы морского дна со скоростью, зависящей от пород, слагающих дно и принимающей значения порядка 1,5-4 км/с.

Как уже упоминалось, глубина проникновения такой волны в среду определяется длиной волны и грубо может быть оценена как ее половина. Следовательно, для прикладных задач поиска полезных ископаемых наиболее привлекательным является частотный диапазон 0,03-1,7 Гц.

В случае шельфа Арктики, кроме шумов океана необходимо учитывать также и волновые процессы, возникающие в ледовом покрове.

Здесь на первый план выходят так называемые изгибно-гравитационные волны, формирующие волновое поле, принимаемое ледовым приемником, скорость которых определяется решением уравнения:

$$\left(\frac{\omega}{v}\right)^4 - \frac{\omega^2 \rho}{h^2 D} + \frac{\rho_0}{h^3 D} \left(g - \frac{i\omega v c_0}{\sqrt{v^2 - c_0^2}} \right) = 0,$$

где ω - частота; v - фазовая скорость; c_0 - скорость звука в воде; h - толщина ледового

покрова; ρ - плотности льда и воды соответственно; $D = E/[12(1-\nu^2)]$; E - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона ледяного покрова; g - ускорение свободного падения. На рис. 1 приведен пример численного решения выпяченного уравнения при характерных для арктического региона параметрах сред.

Как видно, скорость изгибно-гравитационной волны на частотах выше 0,1 Гц определяется толщиной ледового покрова, что позволяет создавать технологии восстановления параметров льда путем измерения этого типа волн. Анализируя график можно сделать вывод что скорость изгибно-гравитационной волны на порядок ниже скорости фундаментальной моды поверхностной волны в диапазоне частот, представляющем интерес для настоящего исследования.

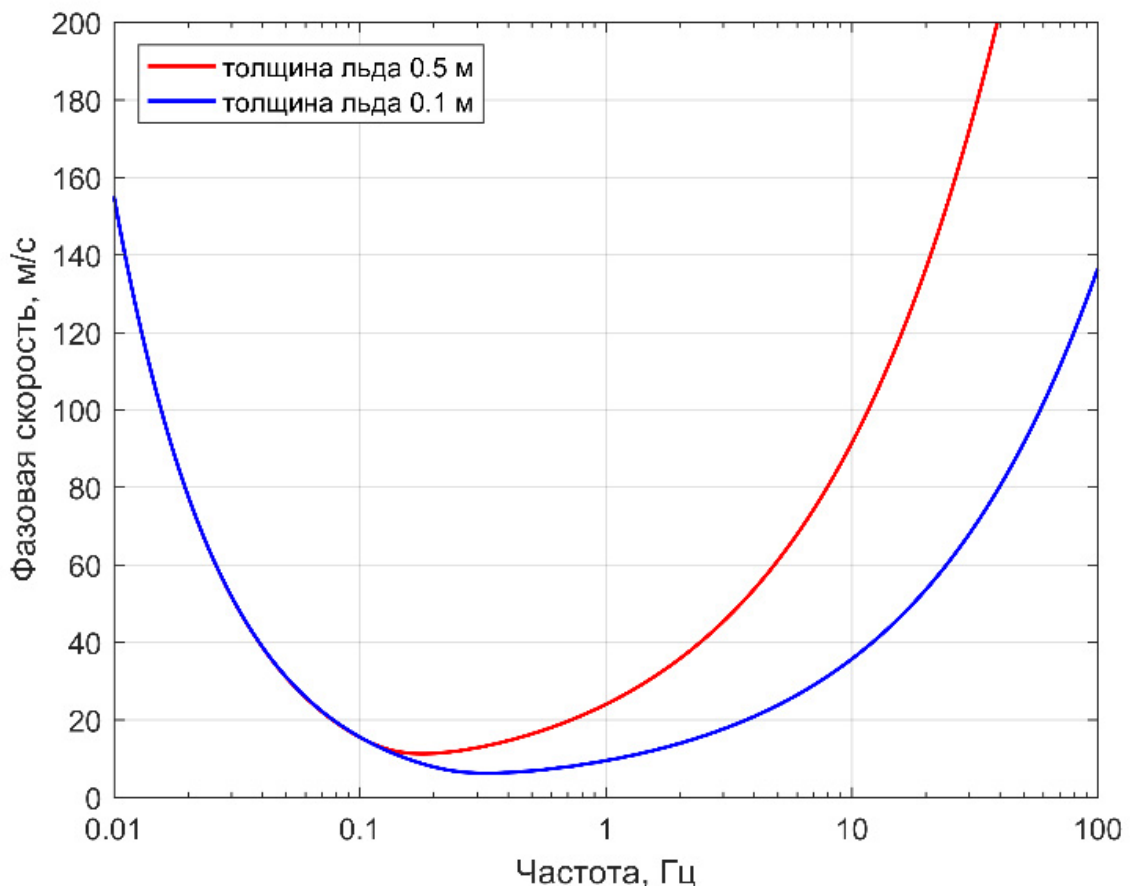


РИС. 2. Дисперсионные кривые изгибно-гравитационных волн при различной толщине льда

В низкочастотной области разделение в принимаемых данных полей изгибной моды и фундаментальной донной поверхностной волны может быть основано на пространственно-временном анализе принимаемых полных полей при соответствующем выборе частотного диапазона.

Раздельное рассмотрение изгибной и фундаментальной мод позволило наметить возможные пути оценки толщины льда и жидкого слоя, а также скорости поперечных волн в дне на основе сопоставления экспериментальных дисперсионных кривых и теоретических зависимостей, полученных для модельной слоистой структуры.

Как уже отмечалось, возможность оценки функции Грина из функции взаимной корреляции шумов была показана многими авторами, однако полученные результаты относились к случаю рассмотрения полного поля.

Для обсуждаемого пассивного мониторинга важно, что аналогичное соотношение справедливо и при рассмотрении отдельных мод.

По-видимому, впервые возможность такой оценки была доказана теоретически в работе [6]. Важно отметить еще один аспект, связанный с корреляционной обработкой именно отдельных модовых сигналов, а не полных полей. Дело в том, что при коррелировании отдельных мод (или в случае корреляционной обработки полей, состоящих из некогерентных мод) возможно существенное сокращение времени накопления шумового поля, требуемого для достоверной оценки корреляционной функции. Этот аспект является принципиально важным для практической реализации пассивных методов мониторинга, однако требует дополнительных экспериментальных исследований в рассматриваемом случае сложной многомодовой системы.

Последним этапом построения новой пассивной технологии сейсмоакустического мониторинга Арктического шельфа является решение задачи аппаратного обеспечения экспериментальной регистрации всех возможных типов волновых возмущений (сейсмических, гидроакустических, изгибных).

Перспективной представляется попытка оценить параметры фундаментальной моды поверхностной волны по измерениям, проводимым на льду или подо льдом в непосредственной близости от него.

Несмотря на высокий уровень шумов, всегда присутствующий при измерениях на льду, возможен выбор частотного диапазона, где подобные попытки могут дать желаемый результат.

Впервые такие экспериментальные результаты были получены учеными ИФЗ РАН при проведении экспериментов в ледовых условиях на Ладожском озере, когда было установлено, что спектральные характеристики микросейсмического шума, регистрируемого на поверхности льда, в точности повторяют аналогичные спектры микросейсм, зарегистрированных на дне водоема.



РИС. 3. Опытный образец информационно-измерительного комплекса ледового класса.

Существующие экспериментальные методы малоприспособлены для применения в суровых ледовых условиях Арктики, в том числе и из-за следующих проблем:

- а) невозможность протяжки донного кабеля,
- б) невозможность передачи информации через лед.

Для решения этих проблем предлагается использовать автономный дрейфующий ледовый измерительный буй, предназначенный для круглогодичного использования. Это позволит выполнять наблюдения непосредственно с ледового покрова, что существенно проще, чем буксировать сейсмические кося в воде или размещать сейсмические приемники на дне.

Для этой цели в ИФЗ РАН совместно с коллегами из МФТИ разрабатывается ледовый измерительный комплекс, в состав которого входят: низкочастотный трехканальный сейсмометр, гидрофон, регистратор, акселерометр и устройство беспроводной передачи данных (рис. 3). Измерительные элементы, созданные на базе принципов молекулярной электроники [7], обладают требуемой чувствительностью в необходимом диапазоне частот и защищены от влияния низких температур.

Разрабатываемые комплексы должны стать составными элементами площадной антенной системы мониторинга заданного региона (рис. 4), позволяющей выполнять трехмерные (3D) исследования характеристик среды томографическими методами.

Предполагается, что геоакустические приемники располагаются по площади на границе исследуемой области, а также, при необходимости, внутри исследуемой области в заданных точках.

В этом случае исходными данными являются времена распространения сейсмоакустических сигналов между всеми сейсмоприемниками, определенные при анализе функции взаимной корреляции шумового фона.

На первом шаге проводится моделирование решения прямой задачи распространения в сложной геологической среде.

Решение полного волнового уравнения в аналитическом виде для неоднородной упругой слоистой среды представляет значительные трудности, поэтому его анализ может производиться, как на упрощенных моделях, так и при помощи более точных численных методов, реализованных на высокопроизводительных вычислительных системах.

Возмущение параметров среды относительно некоторых фоновых значений (известных априори) приводит к изменению дисперсионных зависимостей регистрируемых волновых структур.

Это влияет на характеристики принимаемых сигналов и в рассматриваемом случае приводит к возмущениям времен распространений сигналов между точками наблюдения в заданном частотном интервале.

В итоге использование различных частотных диапазонов при корреляционной обработке естественного микросейсмического шума, позволяет получить информацию о характеристиках исследуемого региона на различных глубинах, то есть рассмотрение нескольких частот сводит 3D задачу восстановления геологических характеристик упругого полупространства к набору 2D задач на разных глубинах.

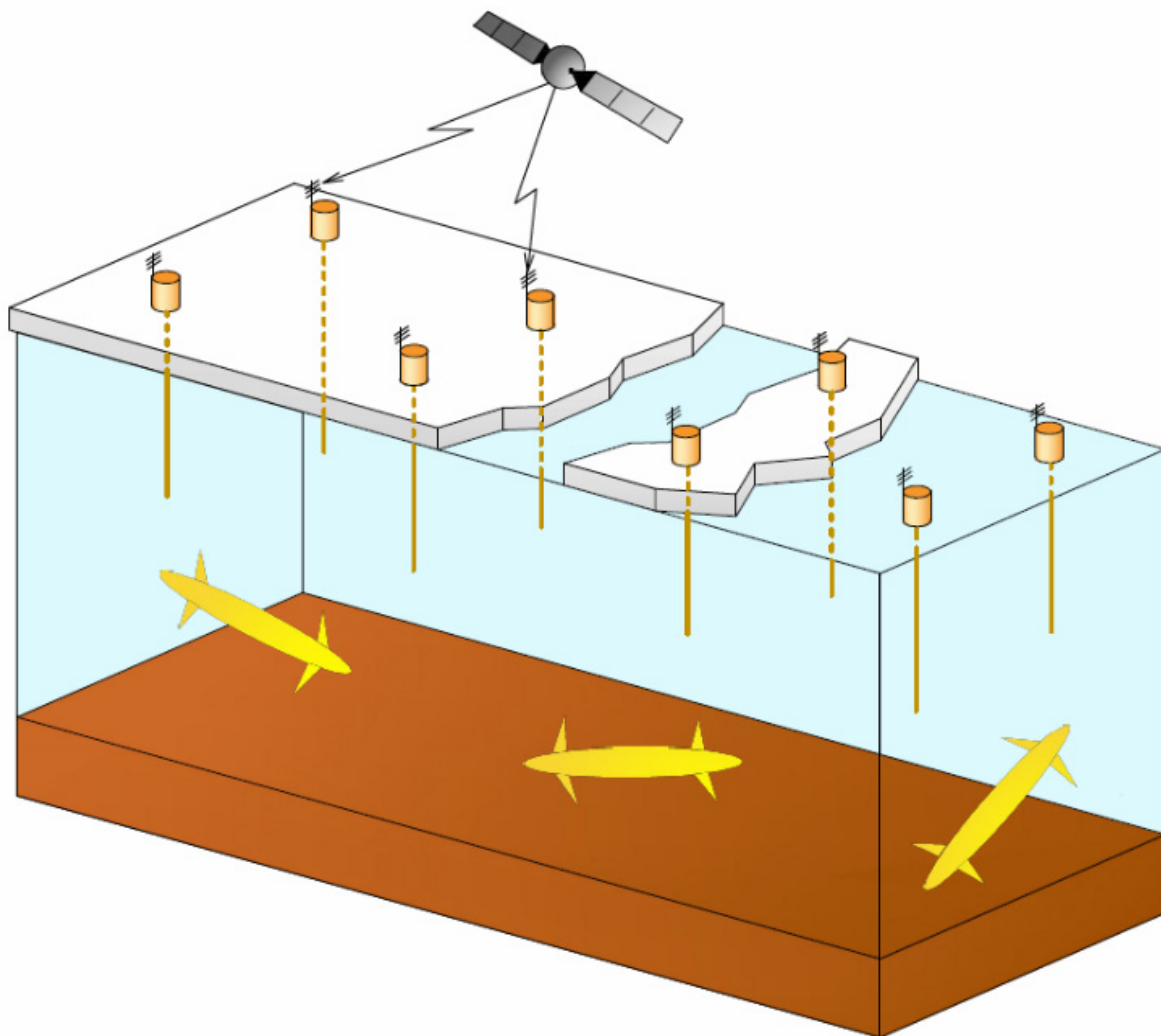


РИС. 4. Принципиальный облик арктической системы сейсмоакустического мониторинга

Настоящая работа основана на результатах многолетних научных исследований, выполненных преимущественно в нашей стране, которые позволяют перейти к созданию принципиально новой технологии мониторинга и разведки месторождений полезных ископаемых на Арктическом шельфе.

На сегодняшний день теоретически и экспериментально обоснована возможность изучения геологической среды в пассивном режиме, основанная на новых физических принципах - не взрывать и принимать, а накапливать и регистрировать.

Таким образом, на первый план выходит разработка инструментальной базы, при помощи которой развиваемые методы будут использоваться на практике.

Перспективы развития системы мониторинга Арктики связаны, по всей видимости, с созданием единой комплексной системы наблюдений, основными элементами которой станут антенны ледового класса и автономные подводные аппараты, связанные акустическими и иными каналами связи в единое информационное пространство.

Ключевыми элементами этой схемы станут:

- 1) система круглогодичных наблюдений при помощи масштабной сети автономных измерительных систем;

2) единые центры сбора и обработки данных измерений, в которых получаемая информация используется для формирования глобальной модели арктического региона, описывающей основные гидрофизические параметры как для текущего времени, так и для формирования прогнозов;

3) крупные натурные эксперименты, направленные как на валидацию и верификацию разрабатываемых моделей, так и на практическое применение получаемых научно-технических результатов.

В результате если раньше для научно-исследовательских работ в Арктике привлекались ледоколы, а сами измерения проводились преимущественно с поверхности льда и требовали постоянного присутствия научного и инженерного коллектива, что в свою очередь ограничивало время проведения экспериментов, то сейчас использование автономных станций позволяет проводить более продолжительные исследования без участия человека вообще, а данные натурных наблюдений собирать и обрабатывать дистанционно.

В автоматическом режиме происходит измерение, накопление и передача данных для обработки и анализа в научные центры, расположенные в разных уголках Земли. Это и будет качественно новый уровень технологического обеспечения исследовательских работ по изучению Арктики.

Литература

1. Кулаков И.Ю. Взгляд на процессы под вулканами через призму сейсмической томографии // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 8. С. 698.
2. Чеботарева И.Я., Володин И.А. Контроль разработки месторождений нефти и газа на основе использования комплекса пассивных геофизических методов нового поколения // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2012. № 2 (6). С. 18.
3. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Цуканов А.А., Тинакин О.В., Комаров А.Ю., Одинцов С.Л., Токман А.К. Новая технология микросейсмического зондирования в задачах изучения глубинного строения месторождений нефти и газа. // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 15.
4. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. С.-Петербург. гос. ун-т. СПб.: Наука. 2015. 166 с.
5. Преснов Д.А, Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 4. С. 426.
6. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акустический журнал. 2008. Т.54. №1. С. 51.
7. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 5.